

# Formelsammlung zur Technischen Thermodynamik

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Hassel  
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik  
Universität Rostock

## Inhaltsverzeichnis

|    |                                                |    |
|----|------------------------------------------------|----|
| 1  | Grundbegriffe .....                            | 3  |
| 2  | Erster Hauptsatz .....                         | 3  |
| 3  | Zweiter Hauptsatz .....                        | 4  |
| 4  | Exergiebilanz .....                            | 4  |
| 5  | Inkompressible feste und flüssige Stoffe ..... | 5  |
| 6  | Ideale Gase .....                              | 5  |
| 7  | Naßdampf .....                                 | 8  |
| 8  | Kreisprozesse .....                            | 8  |
| 9  | Gemische .....                                 | 9  |
| 10 | Gemische idealer Gase .....                    | 9  |
| 11 | Feuchte Luft .....                             | 10 |
| 12 | Chemische Reaktionen .....                     | 10 |
| 13 | Wärmeübertragung .....                         | 11 |
| 14 | Wärmeübertrager .....                          | 12 |

### Umrechnungsbeziehungen des Internationalen Einheitensystems

Krafteinheiten:  $1\text{ N} = 1\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 0,101972\text{ kp}$ ;  $1\text{ kp} = 9,80665\text{ N}$

Temperatureinheiten:  $J = T - 273,15\text{ K}$   $\{J\} = ^\circ\text{C}$   $\{T\} = \text{K}$

| <u>Druckeinheiten</u>                                               | Pa                    | bar                   | kp/cm <sup>2</sup>     | atm                    | Torr                   |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2 = 1\text{ kg/(m} \cdot \text{s}^2) =$ | 1                     | $10^{-5}$             | $1,0197 \cdot 10^{-5}$ | $0,9869 \cdot 10^{-5}$ | $7,5006 \cdot 10^{-3}$ |
| $1\text{ bar} =$                                                    | $10^5$                | 1                     | 1,019716               | 0,986923               | 750,062                |
| $1\text{ kp/cm}^2 =$                                                | $0,980665 \cdot 10^5$ | 0,980665              | 1                      | 0,967841               | 735,559                |
| $1\text{ atm} =$                                                    | $1,01325 \cdot 10^5$  | 1,01325               | 1,033227               | 1                      | 760                    |
| $1\text{ Torr} =$                                                   | 133,3224              | $1,332 \cdot 10^{-3}$ | $1,3595 \cdot 10^{-3}$ | $1,3158 \cdot 10^{-3}$ | 1                      |

| <u>Energieeinheiten</u>                                                | J                | kpm                | kcal                    | kWh                     |
|------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| $1\text{ J} = 1\text{ Nm} = 1\text{ Ws} = 1\text{ kgm}^2/\text{s}^2 =$ | 1                | 0,1019716          | $2,38846 \cdot 10^{-4}$ | $2,77778 \cdot 10^{-7}$ |
| $1\text{ kpm} =$                                                       | 9,80665          | 1                  | $2,34228 \cdot 10^{-3}$ | $2,72407 \cdot 10^{-6}$ |
| $1\text{ kcal} =$                                                      | 4186,8           | 426,935            | 1                       | $1,163 \cdot 10^{-3}$   |
| $1\text{ kWh} =$                                                       | $3,6 \cdot 10^6$ | $0,368 \cdot 10^6$ | 859,845                 | 1                       |

| <u>Leistungseinheiten</u>                                                 | W         | kpm/s     | PS                     | kcal/h   |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|------------------------|----------|
| $1\text{ W} = 1\text{ J/s} = 1\text{ Nm/s} = 1\text{ kgm}^2/\text{s}^3 =$ | 1         | 0,1019716 | $1,3596 \cdot 10^{-3}$ | 0,859845 |
| $1\text{ kpm/s} =$                                                        | 9,80665   | 1         | 0,013333               | 8,4324   |
| $1\text{ PS} =$                                                           | 735,49875 | 75        | 1                      | 632,42   |
| $1\text{ kcal/h} =$                                                       | 1,163     | 0,118594  | $1,5812 \cdot 10^{-3}$ | 1        |

# 1 Grundbegriffe

## Energetische Zustandsgrößen

|                              |                                                                                                                   |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Spezifische innere Energie   | $u$                                                                                                               |
| Spezifische Enthalpie        | $h = u + p v$                                                                                                     |
| Spezifische Entropie         | $s = s_0 + \int_0 \frac{du + p dv}{T}$                                                                            |
| Spezifische Wärmekapazitäten | $c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$ |

## Energetische Zustandsgleichungen homogener Systeme

$$u - u_0 = f(T, v) \quad du = c_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv$$

$$h - h_0 = g(T, p) \quad dh = c_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp$$

# 2 Erster Hauptsatz

Definitionen:

|                             |                                     |                   |                                |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| <b>Äußere Energie:</b>      | $E_a = E_{kin} + E_{pot}$           | homogenes System: | $E_a = m e_a$                  |
| <b>Kinetische Energie:</b>  | $E_{kin} = \int_m \frac{c^2}{2} dm$ | homogenes System: | $E_{kin} = m \frac{c^2}{2}$    |
| <b>Potentielle Energie:</b> | $E_{pot} = g \int_m z dm$           | homogenes System: | $\Delta E_{pot} = mg \Delta z$ |

## 2.1 Geschlossene Systeme

$$W_{12} = W_{R12} + W_{V12} \quad W_{V12} = - \int_1^2 p dV$$

$$W_{12} + Q_{12} = \Delta U + \Delta E_a \quad W_{R12} + \int_1^2 V dp + Q_{12} = \Delta H + \Delta E_a$$

## 2.2 Offene Systeme

$$\dot{W}_t + \dot{Q} + \sum_i (h_{ti} + g z_i) \dot{m}_i = \frac{dU}{dt} + \frac{dE_a}{dt} \quad \text{mit} \quad h_t = h + \frac{c^2}{2}$$

### 2.3 Stationäre Fließprozesse

$$\dot{W}_t + \dot{Q} + \dot{m} \left[ h_a - h_b + \frac{c_a^2}{2} - \frac{c_b^2}{2} + g(z_a - z_b) \right] = 0$$

### 2.4 Mechanische Energiebilanz

$$w_{t12} - w_{R12} - \int_1^2 v dp = \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

## 3 Zweiter Hauptsatz

$$S_{\text{irr}} \geq 0$$

### 3.1 Geschlossene Systeme

Definition der Entropie (Fundamentalrelation): 
$$dS = \frac{dU + p dV}{T} = \frac{dH - V dp}{T}$$

Entropiebilanzen:

$$\frac{dQ}{T} + \frac{dW_R}{T} = dS \quad dS_Q = \frac{dQ}{T} \quad dS_{\text{irr}} = \frac{dW_R}{T} \quad ^1)$$

### 3.2 Offene Systeme

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{irr}} + \sum_i s_i \dot{m}_i = \frac{dS}{dt} \quad ^2)$$

### 3.3 Stationäre Fließprozesse

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{irr}} + \dot{m}(s_a - s_b) = 0$$

## 4 Exergiebilanz

Exergie einer Stoffmenge: 
$$E_{1,U} = U_1 - U_U + E_{\text{kinl}} + E_{\text{potl}} + p_U(V_1 - V_U) - T_U(S_1 - S_U)$$

Exergie eines Stoffstromes: 
$$\dot{E}_{1,U} = \dot{m} \left[ h_1 - h_U + \frac{c_1^2}{2} + g z_1 - T_U(s_1 - s_U) \right] = \dot{m} e_{1,U}$$

Exergie eines Wärmestromes: 
$$\dot{E}_Q = \int \left( 1 - \frac{T_U}{T} \right) d\dot{Q}$$

<sup>1)</sup> In der Literatur auch  $S_{\text{irr}} = S_{\text{prod}}$  und  $S_Q = S_{\text{aust}}$  üblich.

<sup>2)</sup> Für  $T$  bzw.  $T_j$  kann die äußere Temperatur  $T_a$  der Umgebung oder die Temperatur des Systems  $T_i$  benutzt werden, je nachdem ob  $S_{\text{irr}}$  infolge Wärmeübertragung an die Umgebung einbezogen wird ( $T = T_a$ ) oder nicht.

Exergieverluststrom:  $\dot{E}_V = T_U \dot{S}_{irr}$

Exergiebilanzen:

#### 4.1 Geschlossene Systeme

$$E_{W12} + E_Q = E_{2,U} - E_{1,U} + E_V \quad E_{W12} = -\int_1^2 (p - p_u) dV + W_{R12}$$

#### 4.2 Offene Systeme

$$\dot{W}_t + \dot{E}_Q + \sum_i e_{i,U} \dot{m}_i = \frac{dE_U}{dt} + \dot{E}_V$$

#### 4.3 Stationäre Fließprozesse

$$\dot{W}_t + \dot{E}_Q + \dot{E}_{a,U} - \dot{E}_{b,U} = \dot{E}_V$$

## 5 Inkompressible feste und flüssige Stoffe

$$v \approx \text{const} \quad c_p \approx c_v \approx c_F$$

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_F dT \quad h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_F dT + v(p_2 - p_1)$$

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_F}{T} dT$$

## 6 Ideale Gase

### 6.1 Thermische Zustandsgleichung

$$pV = mRT$$

$$pV = nR_m T \quad n = \frac{m}{M} \quad R = \frac{R_m}{M} \quad R_m = 8,3143 \text{ kJ / (kmolK)}$$

$$R = c_p - c_n \quad k = \frac{c_p}{c_n}$$

## 6.2 Energetische Zustandsgleichungen

$$u = u(T) \quad h = h(T)$$

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$$

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = [c_p]_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1) \quad [c_p]_{T_1}^{T_2} = \frac{(T_2 - T_0)[c_p]_{T_0}^{T_2} - (T_1 - T_0)[c_p]_{T_0}^{T_1}}{T_2 - T_1}$$

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v}{T} dT + R \ln \frac{v_2}{v_1} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

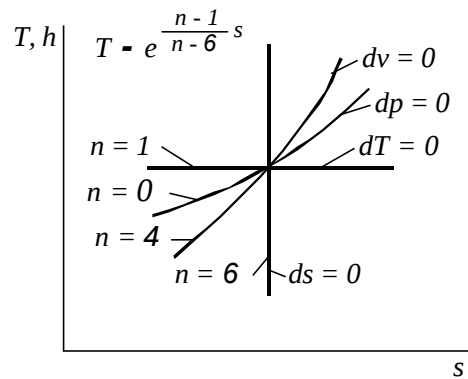
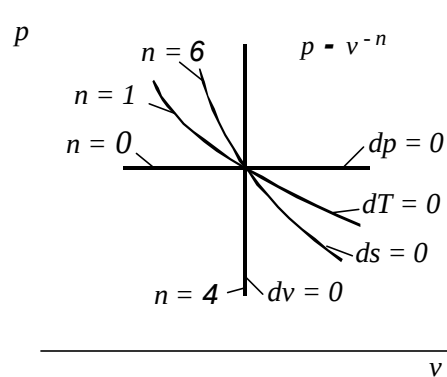
bei  $c_p = \text{const.}$ :

$$u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) \quad h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

## 6.3 Zustandsänderungen

Polytrope:  $p v^n = \text{const}$



**Polytrope Zustandsänderungen idealer Gase:**  $p v^n = \text{const.}$

| Zustandsänderung                                          | Polytrope                                                                                 | Isobare (p=const)                        | Isochore (v=const)                       | Isotherme (T=const)      | Isentrope (s=const)                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Polytropenexponent                                        | $n$                                                                                       | $n = 0$                                  | $n \rightarrow \infty$                   | $n = 1$                  | $n = \kappa$                                                                                        |
| $\frac{p}{p_1} =$                                         | $\left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^{-n}$            | $1$                                      | $\frac{T}{T_1}$                          | $\frac{n_1}{n}$          | $\left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^{-\kappa}$       |
| $\frac{n}{n_1} =$                                         | $\left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\frac{1}{n-1}} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{-\frac{1}{n}}$ | $\frac{T}{T_1}$                          | $1$                                      | $\frac{p_1}{p}$          | $\left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\frac{1}{\kappa-1}} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{-\frac{1}{\kappa}}$ |
| $\frac{T}{T_1} =$                                         | $\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^{-(n-1)}$        | $\frac{n}{n_1}$                          | $\frac{p}{p_1}$                          | $1$                      | $\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^{-(\kappa-1)}$   |
| $w_V = -\int_1 p dn =$                                    | $\frac{1}{n-1} RT_1 \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)$                                       | $-RT_1 \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)$   | $0$                                      | $RT_1 \ln \frac{p}{p_1}$ | $\frac{1}{\kappa-1} RT_1 \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)$                                            |
| $\int_1 n dp =$                                           | $n w_V$                                                                                   | $0$                                      | $RT_1 \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)$    | $w_V$                    | $\kappa w_n$                                                                                        |
| $[q + w_R]_{T_1}^T =$                                     | $\frac{n-\kappa}{n-1} c_n T_1 \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)$                             | $c_p T_1 \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)$ | $c_n T_1 \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)$ | $-w_V$                   | $0$                                                                                                 |
| $s - s_1 = c_p \ln \frac{T}{T_1} - R \ln \frac{p}{p_1} =$ | $\frac{n-\kappa}{n-1} c_n \ln \frac{T}{T_1}$                                              | $c_p \ln \frac{T}{T_1}$                  | $c_n \ln \frac{T}{T_1}$                  | $-R \ln \frac{p}{p_1} =$ | $0$                                                                                                 |

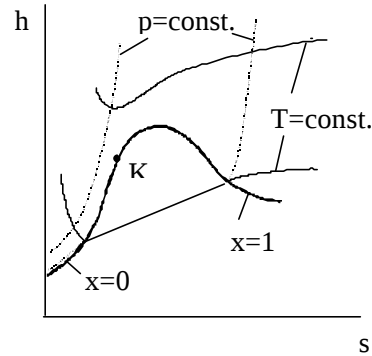
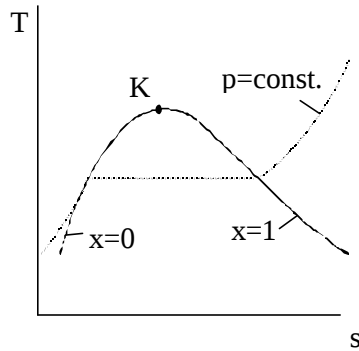
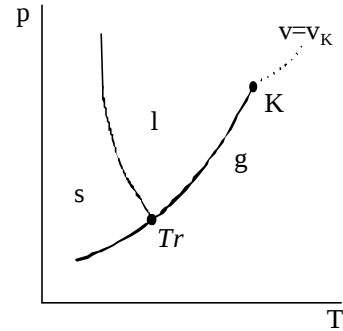
## 7 Naßdampf

$$x = \frac{m''}{m' + m''} = \frac{m_g}{m}$$

$$z = (1-x)z' + xz'' \quad \text{für } z = v, u, h, s$$

( $'$ ) - Eigenschaften der siedenden Flüssigkeit

( $''$ ) - Eigenschaften des trocken gesättigten Dampfes



Clapeyron-Clausius-Gleichung:

$$h'' - h' = T(s'' - s') = T(v'' - v') \frac{dp}{dT}$$

## 8 Kreisprozesse

Rechtsläufiger Kreisprozeß:

$$|\dot{W}_t| = |\dot{Q}_{zu}| - |\dot{Q}_{ab}|$$

$$\text{thermischer Wirkungsgrad: } h_{th} = \frac{|\dot{W}_t|}{|\dot{Q}_{zu}|}$$

$$\text{Carnotprozeß: } h_{th,C} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}$$

Linksläufiger Kreisprozeß:

$$|\dot{W}_t| = |\dot{Q}_{ab}| - |\dot{Q}_{zu}|$$

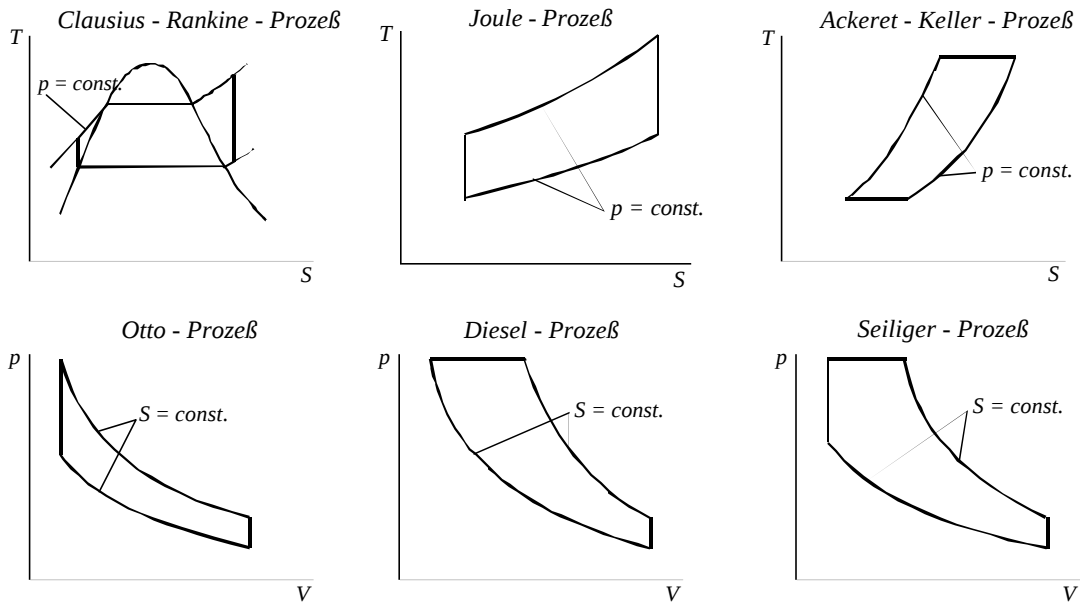
$$\text{Leistungsziffer der Wärmepumpe: } e_w = \frac{|\dot{Q}_{ab}|}{|\dot{W}_t|}$$

$$\text{Carnotprozeß: } e_{w,C} = \frac{T_{\max}}{T_{\max} - T_{\min}}$$

$$\text{Leistungsziffer des Kälteprozesses: } e_K = \frac{|\dot{Q}_{zu}|}{|\dot{W}_t|}$$

$$\text{Carnotprozeß: } e_{K,C} = \frac{T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$

## 8.1 Technische Vergleichsprozesse



## 9 Gemische

|              |                         |              |                       |
|--------------|-------------------------|--------------|-----------------------|
| Masse        | $m = \sum_i m_i$        | Molmenge     | $n = \sum_i n_i$      |
| Massenanteil | $x_i = \frac{m_i}{m}$   | Molanteil    | $y_i = \frac{n_i}{n}$ |
| Molare Masse | $M_i = \frac{m_i}{n_i}$ | Molare Masse | $M = \frac{m}{n}$     |

Molare Masse des Gemisches:

$$M = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{M_i}} = \sum_i (y_i M_i) \quad x_i = y_i \frac{M_i}{M}$$

$$r_i = \frac{m_i}{V} \quad r = \frac{m}{V}$$

$$p_i = y_i p \quad p = \sum_i p_i$$

## 10 Gemische idealer Gase

$$R = \sum_i x_i R_i \quad c_p = \sum_i x_i c_{p_i} \quad c_n = \sum_i x_i c_{u_i}$$

$$pV_i = p_i V = m_i R_i T = n_i R_m T$$

für  $Z = H, U$ :

$$Z(T) = \sum_i Z_i(T) \quad z(T) = \sum_i x_i z_i(T) \quad z_m(T) = \sum_i y_i z_{m_i}(T)$$

$$S(T, p) = \sum_i S_i(T, p_i) \quad s(T, p) = \sum_i x_i s_i(T, p_i) \quad s_m(T, p) = \sum_i y_i s_{m_i}(T, p_i)$$

## 11 Feuchte Luft

W - Wasser (d, fl, f-Phase)

$$m = m_W + m_L$$

L - trockene Luft

$$m_W = m_{Wd} + m_{Wfl} + m_{Wf}$$

$$p = p_L + p_d$$

Wassergehalt:

$$x = \frac{m_W}{m_L} = x_d + x_{fl} + x_f$$

Relative Feuchte:

$$j = \frac{p_d(J)}{p_s(J)}$$

$$x_d = \frac{p_s(J)}{\left(\frac{p}{j} - p_s(J)\right)} \cdot \frac{M_d}{M_L}$$

Sättigungsgrad:

$$X = \frac{x_d}{x_s} = j \cdot \frac{p - p_s(J)}{p - p_d(J)}$$

$$V = m_L \frac{R_d T}{p} \left( \frac{M_d}{M_L} + x_d \right)$$

$$h = \frac{H}{m_L} = h_L + x_d h_{Wd} + x_{fl} h_{Wfl} + x_f h_{Wf}$$

Molare Massen:

trockene Luft:  $M_L = 28,96 \text{ kg/kmol}$

Wasser:  $M_W = 18 \text{ kg/kmol}$  <sup>3)</sup>

trockene Luft

$$h_L(J) = c_{pL} J$$

$$c_{pL} = 1,004 \text{ kJ / (kg K)}$$

überhitzter Wasserdampf

$$h_{Wd}(J) = c_{pWd} J + r_{d0}$$

$$c_{pWd} = 1,86 \text{ kJ / (kg K)}$$

flüssiger Niederschlag

$$h_{Wfl}(J) = c_{pWfl} J$$

$$c_{pWfl} = 4,19 \text{ kJ / (kg K)}$$

fester Niederschlag

$$h_{Wf}(J) = c_{pWf} J - r_{f0}$$

$$c_{pWf} = 2,05 \text{ kJ / (kg K)}$$

Verdampfungsenthalpie bei

$$J = 0^\circ \text{C}$$

$$r_{d0} = 2500 \text{ kJ / kg}$$

Schmelzenthalpie bei

$$J = 0^\circ \text{C}$$

$$r_{f0} = 333 \text{ kJ / kg}$$

## 12 Chemische Reaktionen

$$l = \frac{\dot{n}_{Ox}}{\dot{n}_{Ox, stoech}}$$

<sup>3)</sup> In der Literatur  $M_W/M_L = 0,622$  üblich.

## 13 Wärmeübertragung

Wärmestrom  $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$       Wärmestromdichte  $\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$

### Arten der Wärmeübertragung

**Wärmeleitung** (eindimensional)  $\dot{q}_x = -l \frac{dT}{dx}$

**Wärmeübergang**  $\dot{q} = a (T_F - T_W)$

Kennzahlen bei der Anwendung der Ähnlichkeitstheorie zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten  $a$ :

$$Nu = \frac{a l}{l} \quad Re = \frac{c l}{n} \quad Gr = \frac{g l^3 \Delta p}{n^2 r}$$

$$St = \frac{a}{r c_p c} \quad Pr = \frac{n}{a} \quad a = \frac{l}{r c_p}$$

erzwungene Konvektion:  $Nu = Nu(Re, Pr)$

$$St = St(Re, Pr)$$

freie Konvektion:  $Nu = Nu(Gr, Pr)$

### Wärmestrahlung

Emissionsdichte  $\frac{\dot{E}}{A} = e s_s T^4$

$\Phi_s$  - Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers  $\Phi_s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$

$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A_1} = C_{12} (T_1^4 - T_2^4)$   $C_{12}$  - Strahlungsaustauschkoeffizient

eingeschlossener Körper:  $C_{12} = \frac{s_s}{\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{e_2} - 1 \right)}$

beliebig zueinander liegende Flächen bei Vernachlässigung der Reflexion:  $C_{12} = y_{12} e_1 e_2 s_s$

### 13.1 Stationäre Wärmeübertragung

$\dot{Q} = \frac{-\Delta J}{R}$       Reihenschaltung:  $R = \sum R_i$

Parallelschaltung:  $\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}$

### Übertragungswiderstände

Leitung:  $R_L = \frac{d}{l A_m}$       für  $A = \text{const.}$  (ebene Wand):  $A_m = A$

für  $A = 2 B r l$  (Rohr):  $A_m = \frac{A_b - A_a}{\ln \frac{A_b}{A_a}}$

für  $A = B r^2$  (Kugel):  $A_m = \sqrt{A_b \cdot A_a}$

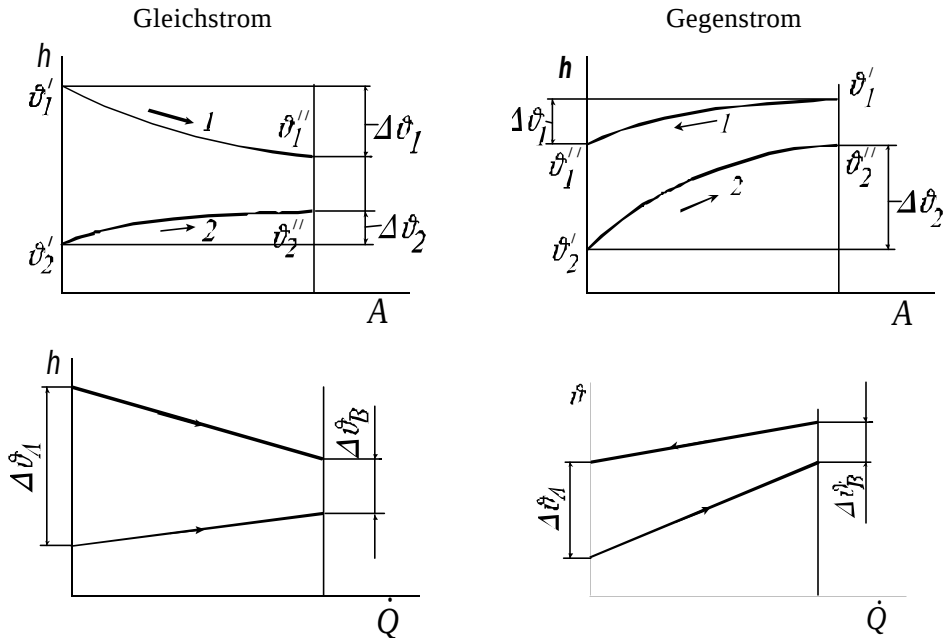
Übergang:  $R_{\bar{U}} = \frac{1}{a A}$

Wärmedurchgang: 
$$R = \frac{1}{(aA)_i} + \sum \frac{d}{l A_m} + \frac{1}{(aA)_a} = \frac{1}{kA}$$

$k$  - Wärmedurchgangskoeffizient (bezüglich Fläche  $A$ )

## 14 Wärmeübertrager

In diesem Abschnitt bedeuten  $dh$ ,  $dQ$  bzw.  $h$ ,  $\dot{Q}$  Beträge dieser Größen!



$$\dot{Q} = \dot{C}_1 \Delta J_1$$

Wärmekapazitätsstrom:  $\dot{C} = \dot{m} c_p$

$$\dot{Q} = \dot{C}_2 \Delta J_2$$

$$\dot{Q} = k A \Delta J_m$$

Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz

für Gleich- und Gegenstrom: 
$$\Delta J_m = \frac{\Delta J_A - \Delta J_B}{\ln \frac{\Delta J_A}{\Delta J_B}}$$

**Diagramme zur Berechnung von Wärmeübertragern** (siehe VDI-Wärmeatlas)  
Einführung charakteristischer dimensionsloser Größen:

$$P_1 = \frac{\dot{Q}}{\dot{C}_1 |(J'_1 - J'_2)|} = \frac{|(J''_1 - J'_1)|}{|(J'_1 - J'_2)|}$$

$$P_2 = \frac{\dot{Q}}{\dot{C}_2 |(J'_1 - J'_2)|} = \frac{|(J''_2 - J'_2)|}{|(J'_1 - J'_2)|}$$

$$R_1 = \frac{\dot{C}_1}{\dot{C}_2}$$

$$NTU_1 = \frac{kA}{\dot{C}_1}$$

$$R_2 = \frac{\dot{C}_2}{\dot{C}_1}$$

$$NTU_2 = \frac{kA}{\dot{C}_2}$$

$|(J'_1 - J'_2)|$  Betrag der Differenz der Eintrittstemperaturen, maximale Temperaturdifferenz

$$P_1 = P_1(NTU_1, R_1)$$

$$P_2 = P_2(NTU_2, R_2)$$